

マグネシア単結晶を用いたキャビテーション壊食の基礎的研究* (表面粗さの影響)

服部 修次^{*1}, 前川 紀英^{*1}, 清水 基晶^{*2}

A Fundamental Study on Cavitation Erosion Using a Magnesium Oxide Single Crystal (Effect of Surface Roughness)

Shuji HATTORI^{*3}, Norihide MAEKAWA and Motoaki SHIMIZU

^{*3} Fukui University, Faculty of Engineering, 9-1, Bunkyo 3-Chome, Fukui, Fukui, 910-8507 Japan

When a material is exposed to cavitation for a long time, the surface is eroded like a sponge, which is one of the evidences of cavitation damage. However, the mechanism of the spongelike surface formation remains unclear. A magnesium oxide single crystal is useful to understand the fundamental mechanisms of cavitation erosion. In this study, magnesium oxide single crystal (100) surfaces were polished with four grades of emery paper to prepare test specimens. The test specimens were exposed to vibratory cavitation. Many dislocation rows with various lengths which intersect the specimen surface at 45 degrees were observed uniformly on a (010) or (001) cross section for an as-cleaved specimen. On the other hand, the dense dislocation rows were localized at the roots of surface irregularity for rough specimens. The depth of surface roughness increases with exposure time and the acceleration is higher for rougher specimens. It is concluded that the dense dislocation rows initiated at the roots of irregular surface is responsible for the growth of the spongelike eroded surface.

Key Words: Cavitation Erosion, Magnesium Oxide Single Crystal, Surface Roughness, Dislocation

1. 緒 言

キャビテーションによる表面損傷の特徴は、気泡崩壊の際生じる衝撃力が極めて短時間に微小面積に作用し、それが繰返されることである。そのために衝撃力によって生じる表面破壊は、普通の衝撃破壊や疲労破壊と異なり極めて局所的である。先に、キャビテーションの気泡崩壊による衝撃力は個体表面の微小領域にランダムに場所を変えながら繰返し作用することを明らかにした⁽¹⁾。それにもかかわらず長時間キャビテーション試験をすると、急速に壊食される部分と壊食されない部分が生じ、前者は海綿状の大きな壊食穴を形成する。このような局所的な損傷は、キャビテーション壊食の特徴の一つ⁽²⁾⁽³⁾であるが、その発生機構についてはほとんど明らかになっていない。

著者らは先に、マグネシア単結晶はすべり系が明らかで、非常に高速の外力が作用してもすべりが発生し、転位検出液によってすべりの状態が明りょうに観察できる材料であることから、これを利用してキャビテー

ション気泡崩壊圧が作用したときの試験片表面の塑性変形挙動について考察した⁽⁴⁾⁽⁵⁾。したがって、この材料を使用すれば、深い壊食穴の形成機構が明らかになることが期待できる。

本研究では、表面の凹凸と壊食の関係を明らかにするために、種々の粗さのマグネシア単結晶の試験片を準備してキャビテーション壊食試験を行い、凹凸の底に生じる塑性変形や破壊挙動について転位エッチピットの観察を通して検討した。

2. 試験片および試験方法

供試材は純度 99.99% のマグネシア単結晶で、5 mm×5 mm×2 mm の大きさにへき開したものを使用した。試験片は、図 1 に示すように (100) 面をへき開したままのもの、# 600 (研摩粒子の平均粒径 20 μm)、# 320 (粒径 40 μm)、# 180 (粒径 80 μm)、# 40 (粒径 350 μm) のエメリー紙で [001] 方向または [010] 方向に研摩したものを用いた。

キャビテーション発生装置には、磁わい振動装置を用いた。増幅ホーンの先端には耐壊食性に優れた直径 16 mm の SUS 304 ステンレス鋼製のディスクを取付けて振動させ、これから所定のすきまを隔ててマグネシア単結晶を対向させて静置し、ディスク端面に生じ

* 原稿受付 1999 年 10 月 7 日。

^{*1} 正員、福井大学工学部 (☎ 910-8507 福井市文京 3-9-1)。

^{*2} 福井日本電気(株) (☎ 919-0402 坂井郡春江町大牧 1)。

E-mail: hattori@mech.fukui-u.ac.jp

たキャビテーションによって壊食させた。振動子の共振周波数は 19.5 kHz で全振幅 (peak-to-peak) 50 μm 一定で実験を行った。試験液はタンク内に一昼夜放置したイオン交換水で、溶存酸素量は 8.11 ppm である。液温は電子恒温装置により $25 \pm 1^\circ\text{C}$ に保持した。

キャビテーション気泡崩壊圧によって損傷を受けた試料の表面や断面の塑性変形の状態は、転位検出液 (塩化アンモニウム飽和水溶液、硫酸、イオン交換水を溶積比で 5:1:1 の割合で混合したもの) 中で 5 min 間エッチングし、メチルアルコール中で 1 min 間超音

波洗浄した後、光学顕微鏡や電子顕微鏡で観察した。

3. 実験結果および考察

3.1 ヘき開材の変形と破壊 マグネシア単結晶へき開材をキャビテーションにさらしたときの塑性変形挙動、破壊挙動についてはすでに報告した⁽¹⁾が、凹凸のある試験片の壊食を考察する上でその結果が必要になるので、以下にその概略を述べる。マグネシア単結晶は六つの $\{110\}$ すべり面を持ち、すべり方向は $\langle 110 \rangle$ 方向である。図 2 はマグネシア単結晶のすべり系の説明図である。図 2(a) では、4 組の $\{110\}$ 面、すなわち (110) , $(1\bar{1}0)$, (101) , $(10\bar{1})$ 面は、表面の (100) 面に対して 45° に交差し、表面に対して 45° の下方方向にすべりが生じる。一方、図 2(b) では、2 組の $\{110\}$ 面、すなわち (011) 面と $(0\bar{1}1)$ 面が表面に対して 90° に交差し、表面に対して平行にすべる。しかし、キャビテーションによる衝撃力は試験片表面に垂直に作用する⁽¹⁾ので後者のすべりは発生しない。したがって、転位列は試験片表面で $[001]$ と $[010]$ 方向に、断面には $[\bar{1}\bar{1}0]$, $[\bar{1}10]$, $[0\bar{1}0]$ 方向に並ぶことになる。

図 3 は、 (100) 面を振動ディスクとのすきま 2 mm でキャビテーションにさらしたときに現れる転位パターンを示している。30 秒後には試験面上に十字形の転位列が現れる [図 3(a)]。転位列は $[010]$ と $[001]$ 方向に伸びている。図 3(b) の 180 秒後になると、十

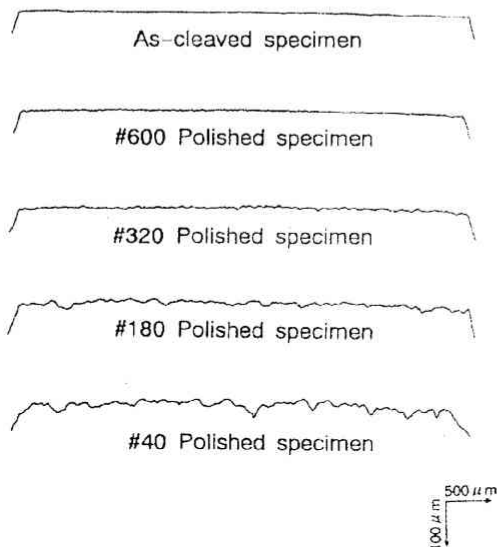


Fig. 1 Surface profiles of MgO as-cleaved and polished specimens before test

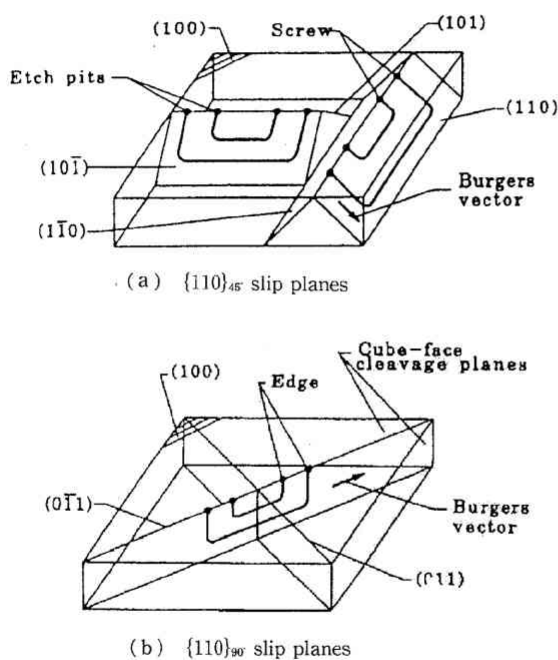
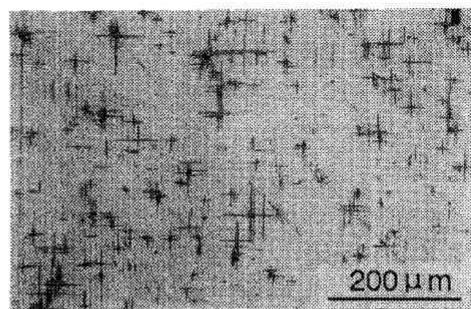
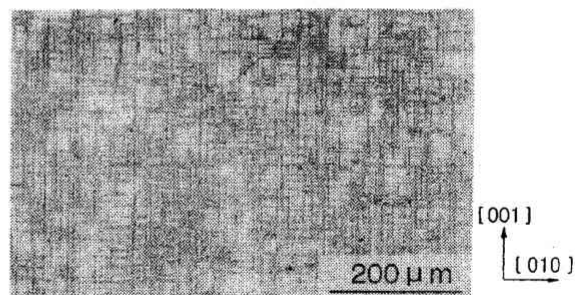


Fig. 2 Slip systems of a MgO single crystal



(a) After 30s



(b) After 180s

Fig. 3 Dislocation-etch-pit patterns on (100) surface of as-cleaved specimen exposed to cavitation

字形の転位列が蓄積して網目状になる。

図4は、キャビテーションに30 min間さらした試験片を(010)面または(001)面に沿って二つにへき開し、エッチングして断面上の転位列を観察したものである。断面上には、表面から45°方向の $[\bar{1}10]$ と $[\bar{1}\bar{1}0]$ 方向の転位列と表面と平行な $[010]$ 方向のさまざまな長さの転位列が観察される。

さらに長時間試験を行って壊食の状況を観察した。図5はすきま1 mmで1時間キャビテーション試験を行った試験片をへき開した断面上の転位列と壊食痕の様子を示したものである。図5(a)は試験片を45°傾けて撮影しているの白い部分が表面、黒い部分が断面である。断面上では表面と45°をなす方向に転位列が著しく密集した箇所が認められる。図5(b)は高倍率で写真撮影した壊食痕とき裂の一例である。き裂は転位列の方向に一致して45°方向に発生している。き裂長さが約3 μm で、転位列の生じている深さが300 μm であるので、き裂は塑性域深さの1/100程度である。

このように、キャビテーション気泡崩壊時に発生する衝撃力はさまざまな深さの転位列を発生させ、さらに長時間試験を行うと塑性域深さの1%程度の長さのき裂が発生する。そのため、数少ない大きな気泡崩壊の衝撃力よりもむしろ数多くの小さな気泡崩壊圧が壊

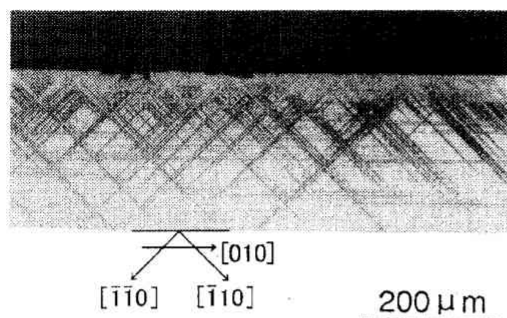
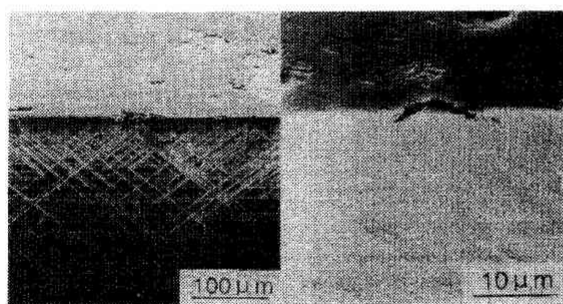


Fig. 4 Dislocation patterns in cross section



(a) Dislocation patterns (b) High magnification

Fig. 5 Erosion pit in cross section

食に寄与していることがわかった。

3・2 試験片の凹凸とキャビテーション壊食 表面の凹凸とキャビテーション壊食の関係を明らかにするためにさまざまな粗さの試験片を用いてすきま2 mmで壊食試験を行った。図6はへき開したままの面と#40 エメリー紙で研磨した状態の壊食面の形状をタリサーフ粗さ計で測定した結果である。へき開材では、6時間後も表面の凹凸はほとんど変化していないが、#40 研磨材では壊食試験前に谷底になった部分がより深く壊食されている。各種研磨材の最大深さの変化を求めたところ、#600 研磨材や#320 研磨材では凹凸が小さいために、必ずしも同一箇所の変化を測定で

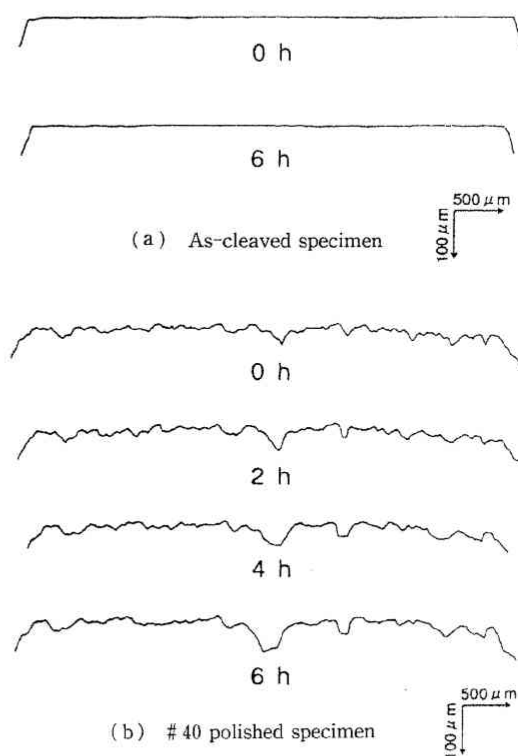


Fig. 6 Surface profiles of eroded surface ($A=50 \mu\text{m}$, $h=2 \text{ mm}$)

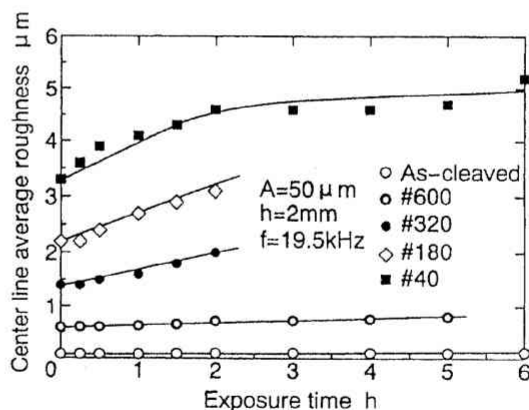


Fig. 7 Variation in surface roughness

きなかった。

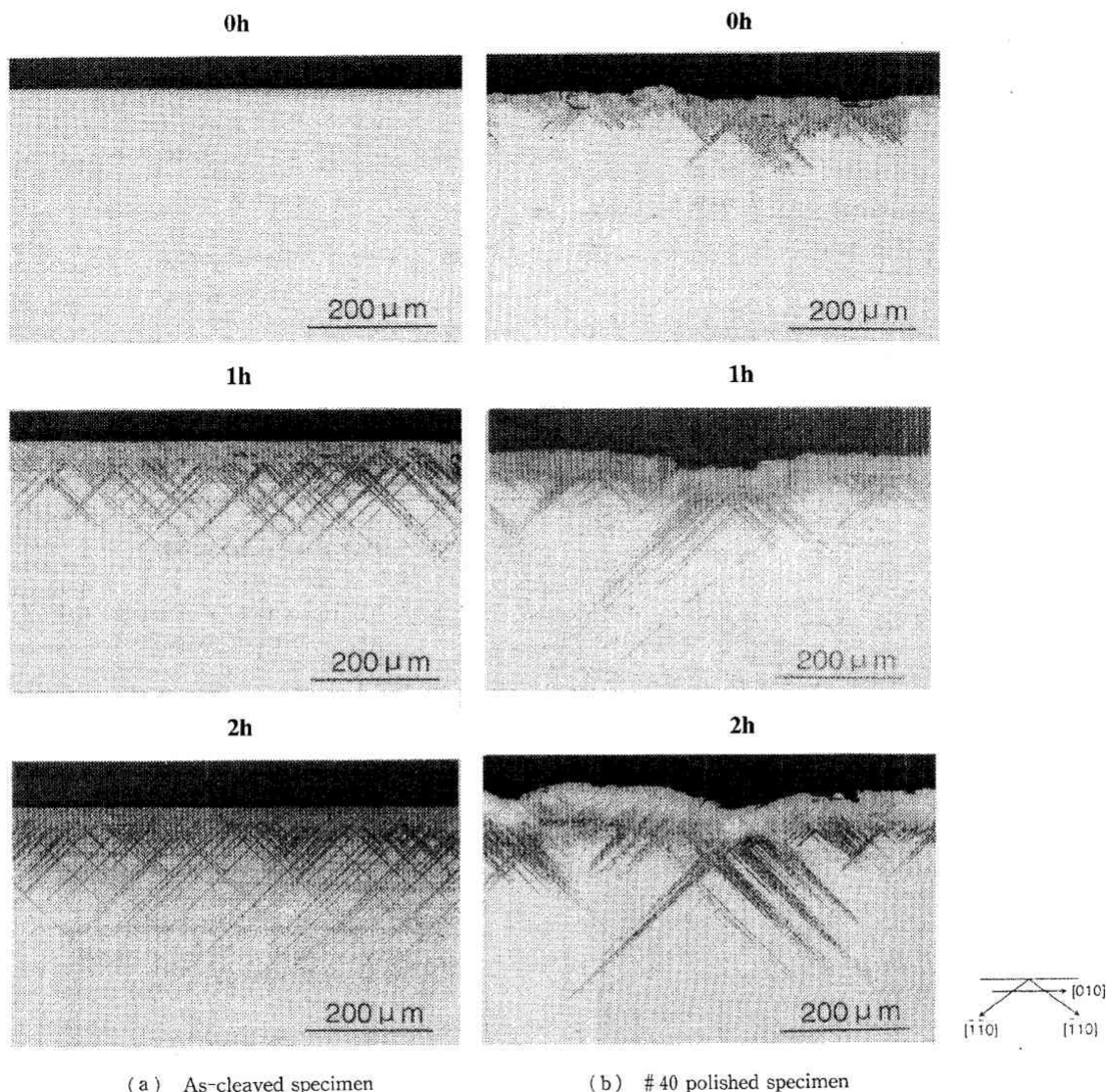
そこで種々の表面粗さの試験片をキャビテーションにさらしたときの研磨材方向に直交方向の中心線平均粗さを求めて凹凸の変化の代わりに用いた。図7はこの結果を示したもので、測定距離は2mm、各実験点は3回の平均値である。へき開材では、6時間後でも粗さは約 $0.1\mu\text{m}$ でやや増加するだけである。大きな粗さの試験片ほど表面粗さは急速に増加する。#40 研磨材では、2時間まで急速に増加するが、その後一定値になる。本研究では、質量減少量の測定は行っていないが、これらの結果は表面粗さの異なる炭素鋼を用いた壊食試験で、試験前の表面粗さが大きい試験片ほど潜伏期間が減少し、さらに質量減少率がますます増加するという報告⁽²⁾⁽³⁾ともよく符合している。

図8に試験片断面上で観察される転位列の写真を示す。へき開したままの試験片では、試験前には転位エッチピットは観察されないが、1時間後になると表面

と 45° をなす転位列が数多く観察される。2時間後には転位列の最大深さはあまり増加せずに転位列の数が増える。#40 研磨材では、研磨したままでも $100\mu\text{m}$ の深さまで転位列が生じている。キャビテーションに1時間あるいは2時間さらすと表面の凹凸のくぼみの部分に密集した転位列が発生する。試験面近傍の白い領域は転位エッチピットの密度が非常に高い領域で、場所によって不均一なものになる。

試験片全断面の5mmの長さにおける転位列の最大深さを測定した。図9は最大深さを試験時間に対してプロットしたもので、どの表面粗さの試験片でも最大深さは1時間までは急速に増加するが、その後は一定値に近づく。#40 研磨材はへき開材や#320 研磨材に比べてやや深くなる。このように初期の表面粗さが大きい試験片では凹凸のくぼみからより深い転位列が局所的に発生する。

図10(a), (b)は、#40の研磨材をキャビテーショ



(a) As-cleaved specimen

(b) #40 polished specimen

Fig. 8 Dislocation patterns in cross section

ンに1hさらした後の断面の転位配列の様子である。図10(a)は、これまでと同様に研磨方向に直交する方向にへき開したものである。凹部の底から幅広い転位列が奥深く発生する。一方、図10(b)は同一試験片を研磨方向と平行にへき開したものである。研磨によって生じた溝に平行にへき開したために、直角にへき開したときよりも表面の凹凸は滑らかに見える。平行にへき開した断面上の転位列は直角にへき開したときに観察される深さの半分程度である。なお、平行にへき開した場合、凹凸の山の部分や谷の部分などさまざまな箇所へき開する可能性があるので、5回同様にしてへき開して観察したが、いずれも図10(b)のような転位配列であった。図10(c)は、表面の凹凸と転位配列の関係を示したすべりの説明図である。キャピテーション気泡が溝底で崩壊した場合には、研磨方向に直交する方向には研磨溝の表面形状の影響を受けて溝底で応力集中するので、断面上の転位列は長くなる。しかし、研磨方向に対して平行な方向では、表面形状の影響を受けないので、転位列の長さはへき開材とそれ

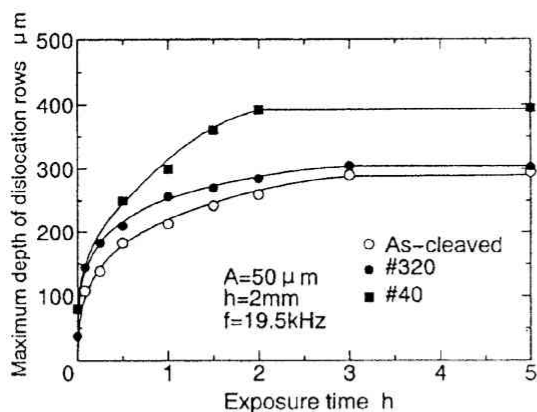


Fig. 9 Variation in maximum depth of dislocation rows

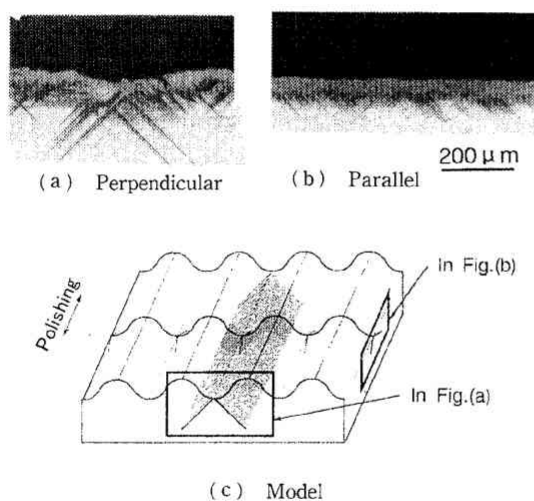
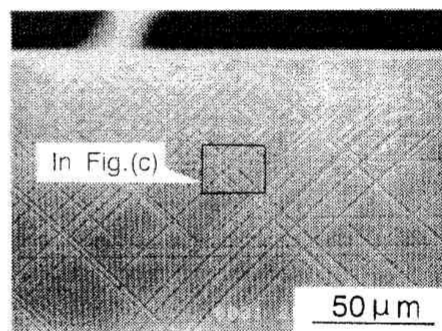


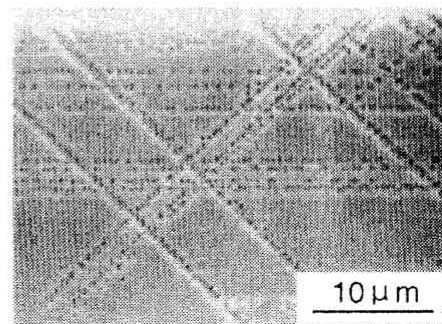
Fig. 10 Effect of polishing direction on dislocation pattern

ほど変わらないことになる。

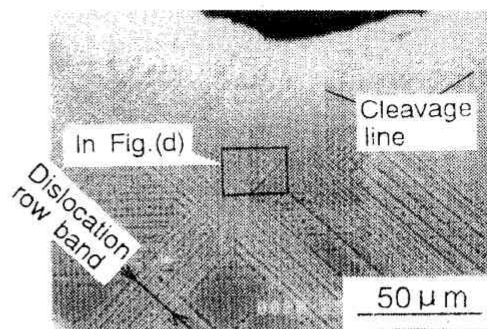
#320 研磨材と#40 研磨材を1hキャピテーションにさらしたのち、研磨方向と直角な方向に試験片をへ



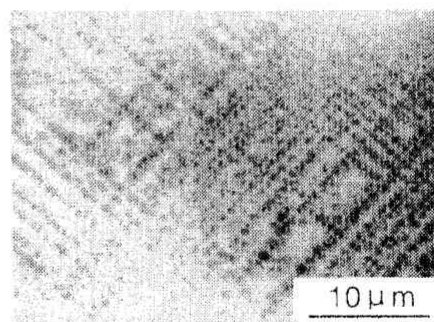
(a) As-cleaved specimen



(b) #40 polished specimen



(c) High mag. of (a)



(d) High mag. of (b)

Fig. 11 Scanning electron photomicrographs of dislocation pattern (after 2 hours)

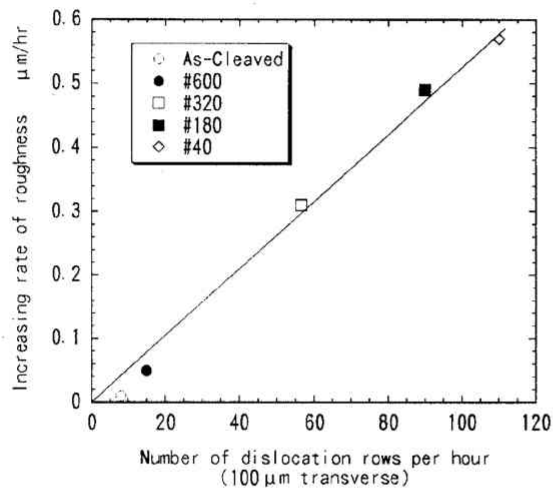


Fig. 12 Relationship between increasing rate in number of dislocation rows and that of roughness

き開し、断面上に現れる種々の表面凹凸のくぼみ深さと転位列深さをの関係を検討した。#320 研摩材のくぼみはいずれも約 10 μm 以下で浅いものであるが、#40 研摩材では約 10~40 μm とさまざまな深さのくぼみが生じる。図は省略するが、くぼみ深さが零の箇所では転位列深さは約 200 μm で、くぼみ深さが 20 μm まではくぼみが深くなると直線的に増加して 300 μm に達する。さらにくぼみ深さが増加しても転位列は徐々に深くなるだけで、40 μm で 330 μm になる。このように、表面の凹凸と転位列の深さはよく対応し、凹部の応力集中によって奥深くまで発生する。

研摩材で観察されるき裂は、3・1 節で示したへき開材と同様に数 μm の長さのものが転位列と同じ 45° 方向に発生する。このことは研摩材では、へき開材に比べて応力集中によってより深く塑性域を生じさせるが、実際に壊食を進展させる領域は、やはり表面層の転位列が密集した部分での小さな脱落によるものであることを示している。

へき開材と#40 研摩材の壊食面直下の転位列を観察した結果を図 11 に示す。へき開材は幅の狭い転位列が一様に発生しているが、研摩材では壊食痕から約 40 μm の転位列の幅広い帯状で発生しているのがわかる。転位列の 1 本ずつが 1 回の気泡崩壊による衝撃力の作用に対応しているの、幅広い帯は凸部のキャピテーション気泡が隣接した谷部へ流れ込み、気泡崩壊の繰返しによるすべりが谷部で発生したことを示している。なお、研摩痕から発生している白い線はき裂ではなく、試験片を二つにへき開したときに生じたへき

開線である。図 11(c), (d) は壊食痕から約 50 μm 直下の高倍率写真である。転位列は、個々のエッチピットが並んだものであるが、へき開材では単一の転位列が非常にまばらに発生している。研摩材では、転位列がバンド状に交差していて転位のエッチピットが高密度で密集している。図 12 は壊食痕から 50 μm の位置で 100 μm の長さにわたって測定した転位列の個数を試験時間 2 時間で除した転位列の増加率と、図 7 から求めた表面粗さの増加率の関係を示したものである。表面粗さの増加速度は転位列密度と良い相関関係にある。このことから壊食痕の成長速度が壊食痕直下の転位列数に大きく依存していることがわかる。

結局、キャピテーション気泡崩壊圧によって凹凸のある表面が形成されると、くぼみ底への気泡の流入やくぼみによる応力集中のためにくぼみ底(壊食痕)直下に転位列が密集し、壊食痕が急速に壊食されることが明らかになった。このことは、キャピテーションにさらされた多くの金属材料で観察されている壊食痕の特徴的な成長によく対応している。

4. 結 言

キャピテーションによる壊食痕の成長挙動を明らかにするために、断面上で塑性変形の状態がよく観察できるマグネシア単結晶を用いて次のような結論を得た。

(1) 表面粗さの大きな試験片をキャピテーションにさらすと、凹凸の底部が壊食を受けて、さらに深い壊食痕に成長する。

(2) へき開したままの試験片は、キャピテーションによって一様に転位が発生するが、表面粗さの大きな試験片ほどくぼみ底部への気泡の流入やくぼみによる応力集中のために転位列が局所化して密集する。

(3) 壊食痕の底部に転位列が集中するとさらに壊食されやすくなり、壊食痕の深さが増大する。このことは多くの金属に観察されるキャピテーション壊食での特徴的な海綿状の壊食面の形成とも一致する。

文 献

- (1) 岡田庸敏・ほか 2 名, 機論, 60-569, A(1994), 147-152.
- (2) 相原彰彦, 電力中研技術第一研報, (1972), 1-13.
- (3) Steller, K. and Reymann, Z., *Proc. Conf. Fluid Machinery 4th*, (1972), 1317-1348.
- (4) Hattori, S., Miyoshi, K., Buckley, D. H. and Okada, T., *Lubricat. Eng.*, 44-1(1986), 53-60.
- (5) 服部修次・ほか 2 名, 機論, 56-527, A(1990), 113-118.